

堆积法制作大芯径磷酸盐光子晶体光纤

张 光^{1,2} 周秦岭¹ 胡丽丽¹ 陈丹平¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所强激光材料重点实验室, 上海 201800)

² 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 采用管棒堆积法制作了芯径为 25 μm 的 Nd 离子掺杂磷酸盐玻璃实芯光子晶体光纤(PCF),并测定了它的光学性能。用 808 nm 半导体激光端面抽运 50 cm 长的 PCF。结果显示,与同组成的玻璃细棒相比,PCF 在 1060 nm 附近的自发辐射放大(ASE)较强,而 900 nm 和 1330 nm 发光峰被抑制,同时 1060 nm 峰的线宽变窄。PCF 在 1060 nm 的传输为单模,传输损耗为 9.1 dB/m,这种 PCF 在光纤激光器领域有着潜在的应用前景。

关键词 光纤光学;光纤激光器;光子晶体光纤;堆积法;大芯径

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0106003

A Large Core Phosphate Photonic Crystal Fiber Made by a Stack-and-Draw Technique

Zhang Guang^{1,2} Zhou Qinling¹ Hu Lili¹ Chen Danping¹

(¹ Key Laboratory of High Power Laser Materials, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Nd-doped phosphate glass photonic crystal fiber (PCF) with a 25 μm diameter core was prepared by the stack-and-draw method. Amplified spontaneous emission (ASE) spectra of the PCF were investigated by end pumping. The result showed that PCF has stronger peak at 1060 nm and dramatically weakened peaks at 900 nm and 1330 nm, while linewidth of the peak at 1060 nm gets narrower slightly than linewidth of glass rod. The single mode operation was obtained at 1060 nm with a measured loss of 9.1 dB/m. The potential advantages of application in the area of fiber laser were discussed.

Key words fiber optics; fiber laser; photonic crystal fiber; stack-and-draw method; large core

OCIS codes 060.2280; 060.5295; 060.2430; 060.3510

1 引言

光子晶体光纤(PCF)是通过在包层中引入规则排列的平行于纤芯并贯穿整个光纤的微孔阵列而把光束束缚在纤芯形成波导的。独特的结构使 PCF 具有很多新颖的特性,如无限截止单模、极高的非线性、可调色散和大模场单模等^[1~4]。PCF 按形成波导的机理可以分为折射率引导型 PCF 和光子带隙型 PCF。对于前者,微孔的出现使包层的有效折

率降低,通过全反射把光束束缚在纤芯形成波导。这种 PCF 包层有效折射率的变化可以控制在 10^{-4} 量级^[5],比传统光纤低 1 个数量级。这就意味着 PCF 可以获得更大的模面积并保持单模。光子带隙型 PCF 是在包层中形成光子带隙,处于带隙频率处的光子就被束缚在纤芯中形成波导。近来,国内在 PCF 高精度折射率传感器、超连续光谱和 PCF 激光器等^[6~10]方面的研究也取得较大的进展,对提高

收稿日期: 2010-04-09; 收到修改稿日期: 2010-06-04

基金项目: 国家自然科学基金(60878043,60707019,50911140475)资助课题。

作者简介: 张 光(1984—),男,博士研究生,主要从事特种光纤特性和制作工艺方面的研究。

E-mail: maxzw2008@163.com

导师简介: 陈丹平(1960—),男,研究员,博士生导师,主要从事微结构光纤制备和性能以及活性离子掺杂玻璃与陶瓷光电功能材料等方面的研究。E-mail: d-chen@mail.siom.ac.cn

PCF 的制作工艺水平满足国内 PCF 的需求有着重要的现实意义。由于光子带隙型 PCF 的制作工艺要求很高,实验采用稀土掺杂的折射率引导型 PCF 进行了研究。

PCF 的制作^[11]主要包括预制棒的设计、制作和拉丝三个阶段。对于较硬的材料,如石英和大多数玻璃,通常是用堆积法^[5]制作 PCF 的预制棒,即把一些具有相同外径的毛细管和细棒按一定规则堆积而得到预制棒。对非石英玻璃材料,如碲酸盐玻璃和硫化物玻璃,它们具有比石英玻璃高很多的非线性系数,已被用于制作高非线性 PCF^[12,13]。磷酸盐玻璃与石英玻璃相比具有高得多的稀土掺杂浓度、较低的非线性系数、无光致变暗现象和制备温度较低等优点。这些特性使磷酸盐玻璃可以获得较高的增益系数,同时避免非线性现象(如受激布里渊散射等),非常适合制作成高功率短光纤激光器。最近, Lee 等^[14]用 Yb 掺杂的磷酸盐玻璃 PCF 得到了 57 W 的单模输出。唐玉龙等^[15]用 4 cm 长的矩形磷酸盐玻璃光纤实现了单模输出。这显示了磷酸盐玻璃的 PCF 在短光纤单模激光器领域有着重要的应用前景。

本文采用旋转法将块状玻璃制作成规则且光学性能良好的毛细管,用堆积法制作了 Nd 掺杂磷酸盐玻璃 PCF,并对该 PCF 的性能进行了测试。

2 实验与讨论

实验的原料是磷酸盐激光玻璃($K_2O-BaO-Al_2O_3-P_2O_5$),其 Nd^{3+} 的离子浓度为 $2.26 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$,受激发射为 $4.0 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$,在 1060 nm 的折射率为 1.528。这种原料的玻璃稳定性良好,经过制管、拉丝等多次热循环也不会出现析晶。毛细管的制作包括 3 个步骤:1)将上述的磷酸盐玻璃放入套管中进行加热,套管可以是不锈钢管、石墨管、氧化铝陶瓷管和石英玻璃管;2)用管式炉加热套管到一定温度(软化点以上 $100 \text{ }^\circ\text{C}$)使磷酸盐玻璃软化,并高速旋转($900 \sim 2500 \text{ r/min}$) $10 \sim 30 \text{ min}$ 。离心力的作用会使玻璃均匀地附着在套管内壁;3)降低温度和转速,让高速旋转的套管缓慢停下来,同时消除玻璃管的应力。由于磷酸盐玻璃的热膨胀系数($10.7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$)与套管不一样,适当的退火速度可以使玻璃管和套管完整地脱开,这种方法具有比较广的适用性。采用上述工艺得到了外径为 12.7 mm,长为 16~20 cm,壁厚约为 1.5 mm,几何结构规则和光学质量良好的玻璃管,如图 1(a)所示。用拉丝塔拉制磷酸盐玻璃毛细管,控制拉丝条件(如拉丝温度、管内气压等)可以改变

毛细管孔的相对大小。加热温度在 $540 \text{ }^\circ\text{C} \sim 660 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内,外径缩小 100 倍的情况下也可以有效控制毛细管的内径尺寸,如图 1(b)和(c)所示。

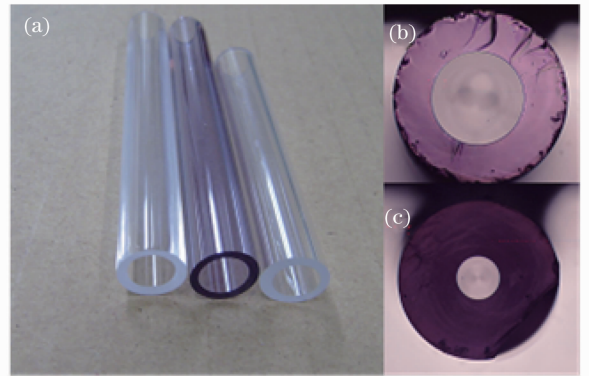


图 1 (a)旋转法制作的磷酸盐玻璃管;磷酸盐毛细管(外径为 1 mm)截面的显微照片,(b)大孔,(c)小孔

Fig. 1 (a) Phosphate glass tubes produced by centrifugation method; optical photographs of the cross-sectional views of phosphate capillaries (1 mm outside diameter) with a (b) big and (c) small hole

磷酸盐 PCF 的外径为 $240 \mu\text{m}$,空气孔直径 $d = 5 \mu\text{m}$,间距 $\Lambda = 16 \mu\text{m}$,芯径达到 $25 \mu\text{m}$,如图 2(a), (b)所示。根据 PCF 的模式理论,预制棒中单个毛细管被实芯棒代替形成芯,得到 PCF 的单模条件为 $d/\Lambda < 0.4$,所以实验制作的 PCF ($d/\Lambda = 0.3$) 满足单模条件。为了测试 PCF 的模式,用 10 倍物镜将 808 nm 的半导体激光耦合到长为 50 cm 的 PCF 中,用 CCD 得到的近场光斑如图 2(c)所示。由于 Nd 掺杂的磷酸盐玻璃在 808 nm 激光抽运下,会在 900, 1060 和 1330 nm 三处附近产生荧光,当在 CCD 前放置了 900 nm ($T \approx 0.2\%$) 的滤波片,将抽运光和 900 nm 的荧光滤掉后,图 2(c)应为 1060 nm 和 1330 nm 两处 PCF 的近场模式。可以看出光被束缚在 PCF 芯中,没有明显的高阶模出现,模场直径约为 $20 \mu\text{m}$ 。小幅度地改变耦合条件和弯曲光纤,近场光斑保持稳定,这说明 PCF 的模式性能良好。图 3 为滤波片的透射谱。

抽运光足够强时,PCF 芯中的自发辐射会被放大,用光谱仪测量可以得到 PCF 的自发辐射放大(ASE)。忽略不同波长传输损耗的差异,ASE 谱可以准确衡量 PCF 的增益情况。在同样的耦合条件与模式测量条件下,用 20 cm 长的 PCF 作为增益介质,808 nm 光源的功率为 200 mW,用精度为 0.2 nm 的光谱仪(型号为 ZOLIX SBP300)代替上面的 CCD,得到了 ASE 谱,其结果如图 4 所示。为了

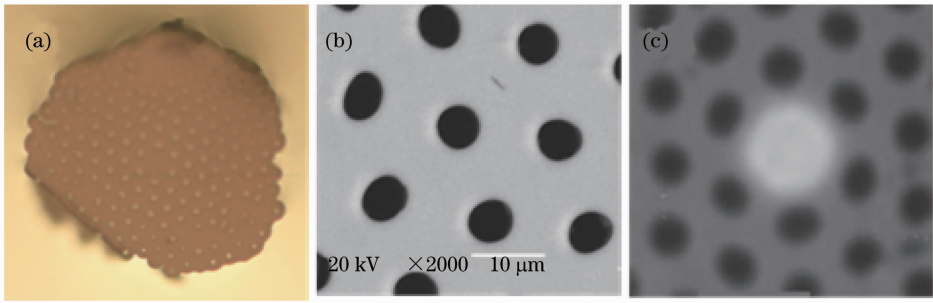


图 2 PCF 的端面显微照片(a),扫描电镜照片(b)和近场光斑(c)

Fig. 2 (a) Microscope scanning, (b) microscope images and (c) near-field pattern of PCF

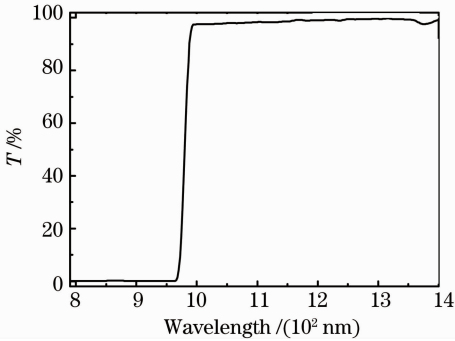


图 3 滤波片的透射谱

Fig. 3 Transmission of the filter

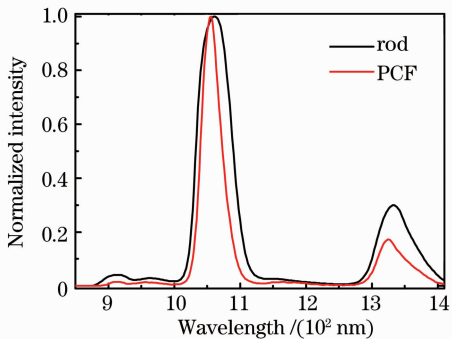


图 4 PCF 和棒的 ASE 谱

Fig. 4 ASE spectra of PCF and rod

对比,同时测量了同样外径的、同组成玻璃细棒的 ASE 谱。可以看出,PCF 和玻璃棒最强的峰都在 1060 nm 附近;PCF 在 900 nm 和 1330 nm 处的相对强度比玻璃棒低,且在 1060 nm 处的峰变窄。严格来讲,PCF 和玻璃棒损耗较大,200 mW 的抽运光并不能让 PCF 和玻璃细棒完全实现粒子数反转,ASE 只在靠近抽运端一定长度出现。实验测量到的是 ASE 和荧光的叠加。由于 ASE 谱的线宽小于荧光线宽,单模 PCF 的损耗较低,测量结果中 ASE 的比重增加,使得 1060 nm 峰的线宽减小。图 5 为 PCF(长为 20 cm)在不同功率抽运下 1060 nm 附近 ASE 的变化。随着抽运功率的增加,ASE 线宽呈现非线性变窄。

采用截断法(Cutback method)测量了长度为 160 cm 的 PCF 的传输损耗。PCF 端面用红宝石光纤刀切平,以增加耦合效率。因为没有合适的 1060 nm 光源,这里采用 2 W 的 808 nm 半导体激光器来代替。准直后的激发光用 10 倍物镜耦合到 PCF 中。160 cm 长的 PCF 每次被截断约为 20 cm,共测量了 7 次输出端的功率,线性拟合得到 PCF 的传输损耗约为 9.1 dB/m,测量数据如表 1 所示。 ΔL 为 PCF 每次截断的长度, P_{out} 为 PCF 的输出功率,Loss 为线性拟合得到的平均损耗。测量时激发光被在 808 nm 处透射率小于 0.2% 的滤波片滤除。这个结果反映了该 PCF 在 1060 nm 附近的传输损耗是一个可以接受的水平,能满足激光的要求。

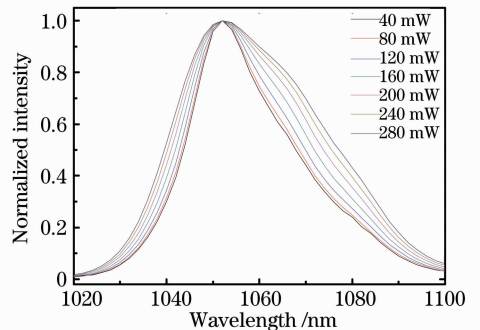


图 5 PCF 的 1060 nm 峰宽随抽运功率的变化

Fig. 5 Linewidth at 1060 nm versus the value of the pumping power

表 1 PCF 的损耗测量

Table 1 Loss measurement of PCF

| ΔL /cm | P_{out} /mW | Loss / (dB /m) |
|----------------|---------------|----------------|
| 0 | 4.7 | |
| 21 | 7.3 | |
| 20 | 9.7 | |
| 22 | 13.7 | 9.1 |
| 25 | 22.8 | |
| 22.5 | 40.3 | |
| 20 | 72.5 | |

3 结 论

采用堆积法制作了 Nd 掺杂磷酸盐玻璃 PCF, 测量了 PCF 的模式、损耗和 ASE 谱。结果表明, 该 PCF 在 1060 nm 附近为单模, 传输损耗约为 9.1 dB/m。ASE 谱在 1060 nm 处的峰变窄, 且相对强度增加。这些结果显示该光纤性能有利于在 1060 nm 附近实现粒子数反转, 实验也表明磷酸盐 PCF 可以在 1060 nm 附近产生单模激光。

参 考 文 献

- 1 T. A. Birks, J. C. Knight, P. Russell. Endlessly single-mode photonic crystal fiber[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(13): 961~963
- 2 J. C. Knight, J. Arriaga, T. A. Birks *et al.*. Anomalous dispersion in photonic crystal fiber[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(7): 807~809
- 3 J. K. Ranka, R. S. Windeler, A. J. Stentz. Visible continuum generation in air-silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800 nm[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(1): 25~27
- 4 J. Limpert, T. Schreiber, S. Nolte *et al.*. High-power air-clad large-mode-area photonic crystal fiber laser[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(7): 818~823
- 5 J. Limpert, T. Schreiber, A. Tunnermann. Fiber based high power laser systems. http://www.iap.uni-jena.de/laser/_media/laser_systems.pdf
- 6 Hou Yu, Zhou Guiyao, Hou Lantian *et al.*. Analysis of dispersion properties of octagonal structural photonic crystal fiber with double cladding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 1068~1072
侯宇, 周桂耀, 侯蓝田等. 八边形双包层光子晶体光纤色散特性分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 1068~1072
- 7 Zhao Yu, Jin Yongxing, Dong Xinyong *et al.*. Experimental studies of multimode interference based fiber optic refractive index

- sensors[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1516~1519
赵宇, 金永兴, 董新永等. 基于多模干涉的光纤折射率传感器的实验研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1516~1519
- 8 Wang Yanbin, Hou Jing, Liang Dongming *et al.*. Study of supercontinuum generation in the normal-dispersion regime of photonic crystal fibers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 1073~1077
王彦斌, 侯静, 梁冬明等. 光子晶体光纤正常色散区超连续谱产生的研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 1073~1077
 - 9 Zhang Yuying, Zhang Chi, Hu Minglie *et al.*. Free-output-coupler high-power all-normal-dispersion femtosecond photonic crystal fiber laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 64~67
张玉颖, 张弛, 胡明列等. 自由耦合输出的高功率全正色散光子晶体光纤飞秒激光器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 64~67
 - 10 Ke Tao, Zhu Tao, Rao Yunjiang *et al.*. Accelerometer based on all-fiber Fabry-Perot interferometer formed by hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 171~175
柯涛, 朱涛, 饶云江等. 基于空芯光子晶体光纤的全光纤法布里-珀罗干涉式加速度传感器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 171~175
 - 11 G. Barton, M. A. Eijkelenborg, G. Henry *et al.*. Fabrication of microstructured polymer optical fibers[J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2004, **10**(4): 325~335
 - 12 X. Feng, W. H. Loh, J. C. Flanagan *et al.*. Single-mode tellurite glass holey fiber with extremely large mode area for infrared nonlinear application[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(18): 13651~13656
 - 13 L. Brilland, F. Smektala, G. Renversez *et al.*. Fabrication of complex structures of holey fibers in chalcogenide glass[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(3): 1280~1285
 - 14 Y. Lee, M. Dignonnet, S. Sinha *et al.*. High-power Yb³⁺-doped phosphate fiber amplifier[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2009, **15**(1): 93~102
 - 15 Y. L. Tang, Y. Yang, J. Q. Xu. Side-pumped short rectangular Nd-doped phosphate glass fiber lasers[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(8): 583~585